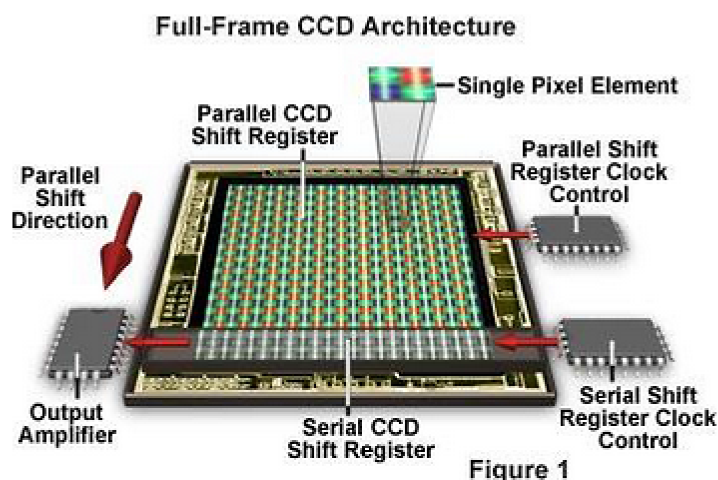
Cámara Digital CCD

¿Qué es exactamente una cámara digital?

Pues una cámara digital emplea un CCD para capturar imágenes. Aquí está el truco: un CCD es analógico, entonces ¿dónde está lo digital? El meollo reside en un convertidor analógico/digital (A/D) integrado cerca del sensor, que traduce sus señales eléctricas a un lenguaje que los ordenadores comprenden. No todas las cámaras con CCD son digitales; las de videovigilancia, por poner un caso, frecuentemente carecen de este conversor. El CCD, o Dispositivo de Carga Acoplada, genera en esencia un flujo de voltajes analógico.

Funcionamiento de un CCD

En el fondo, un CCD es un componente analógico que produce ese flujo de voltajes.



Arquitectura de un CCD

Durante la exposición, todos los fotodiodos del CCD se encargan de detectar fotones. Una vez absorbidos y convertidos en electrones, el chip procesa esta información leyendo sus líneas en paralelo mediante el registro en serie.

Los datos del registro serie se envían secuencialmente a un amplificador interno. Básicamente, un CCD es un array de elementos fotosensibles (píxeles) responsables de captar la imagen.

Los fotones que impactan el fotodiodo de cada píxel liberan electrones. Estos fotoelectrones se almacenan en pequeños pozos denominados "pocillos". La carga acumulada en cada uno fluctúa según la luz recibida, siendo proporcional a su intensidad.

Los fotoelectrones se trasladan en paralelo al registro serie del CCD. La carga de este registro se transfiere píxel a píxel al amplificador, donde se amplifica y se convierte en una señal analógica (voltaje).

El CCD es analógico porque genera señales eléctricas a partir de los fotones. Para digitalizarlas y obtener datos binarios, se requiere un convertidor A/D externo.

Eficiencia cuántica

La eficiencia cuántica de un CCD se refiere a su sensibilidad espectral: o sea, la probabilidad de que un fotón de una longitud de onda específica genere un fotoelectrón. En un CCD estándar, la EC es prácticamente nula bajo 400 nm y alcanza su máximo en el infrarrojo (IR). Dada esta altísima sensibilidad al IR, es fundamental usar un filtro en la óptica. Sin él, las imágenes mostrarían un fondo demasiado elevado.

Esta eficiencia es especialmente relevante en aplicaciones de baja luminosidad, donde una mayor sensibilidad es crucial para obtener imágenes nítidas y detalladas.

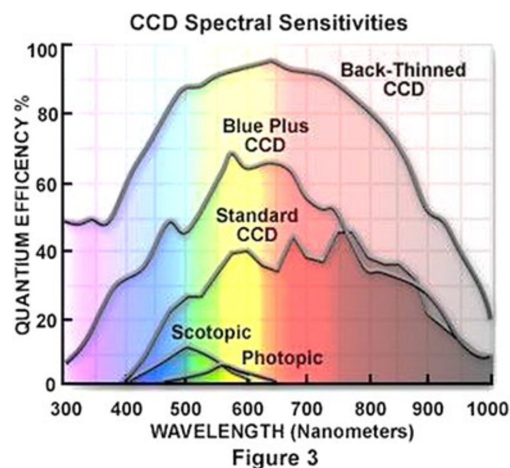


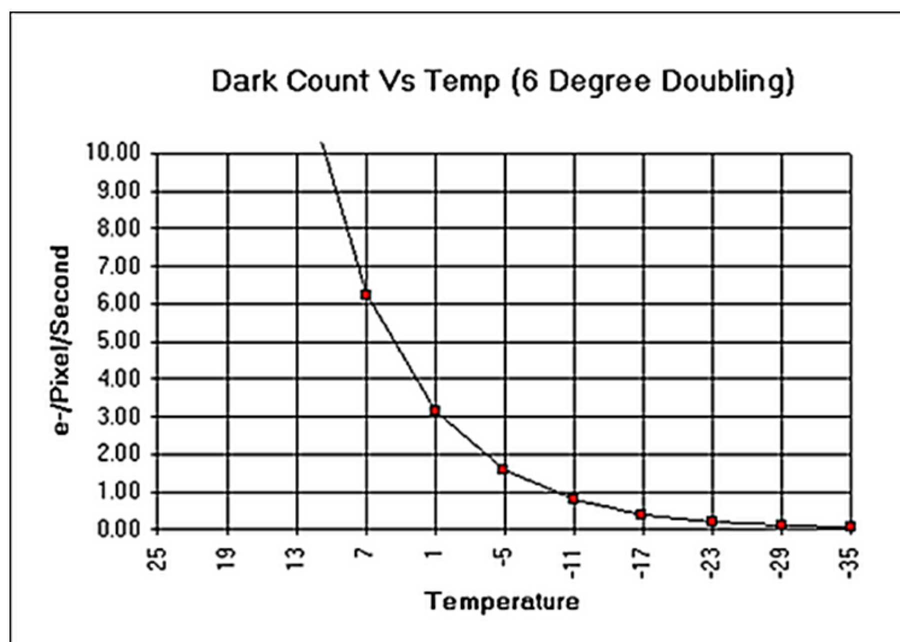
Figure 3

Toda foto digital sufre de ruido. Los tipos más comunes son:

Ruido Fotónico: Proviene de la naturaleza cuántica de la luz. Los fotones que golpean el CCD generan fotoelectrones siguiendo una distribución de Poisson. Al ser inherente a la luz, este ruido es inevitable.

Ruido térmico (Dark noise): Importa diferenciar los termoelectrones generados (Dark Count) del ruido térmico per se. El Dark Count se mide en e-/píxel/segundo. Un CCD que produce 50 e-/s/p a 25ºC tendrá un Dark Count de 3000 e-/min. Este valor crece exponencialmente con la temperatura, duplicándose cada 6ºC más o menos.

Ruido de lectura: Este ruido emerge en el proceso de lectura. Experimentos confirman que una misma carga en un píxel no siempre produce idéntico resultado en el conversor A/D. Lo generan el amplificador interno y el conversor. A mayor velocidad de lectura, más ruido. En velocidades altas, su impacto en el ruido total puede ser significativo. Es comparable a un peaje en autopista: existe un coste base, y al ir más rápido, el peaje aumenta.



¿Cómo mitigar el ruido?

El ruido fotónico es ineludible, inherente a la luz.

El ruido térmico puede reducirse, hasta eliminarse, refrigerando el CCD. Existen métodos como los dispositivos Peltier. Cada 6ºC de enfriamiento reduce la dark current a la mitad. Aunque enfriar siempre mejora el rendimiento, el beneficio es marginal para exposiciones brevísimas de pocos segundos.

El ruido de lectura puede mejorarse (no eliminarse por completo) optimizando la electrónica de la cámara. Asimismo, reducir la velocidad de lectura ayuda a atenuarlo.

Frame rate (refresco en pantalla)

Un aspecto clave de una cámara CCD digital son los frames por segundo (fps) que proporciona, es decir, cuántas imágenes refresca por segundo en el monitor. El frame rate depende de múltiples variables, tanto de la cámara como del ordenador. Los dos factores principales son el tiempo de exposición y la velocidad de lectura del CCD. La fórmula simplificada es:

Frame Rate (fps) = 1 / ((Número de píxeles del CCD / Velocidad de lectura) + Tiempo de exposición)

Ejemplo: para una cámara de 1.300 x 1.000 píxeles y velocidad de lectura de 5 MHz, con un tiempo de exposición de 300 ms, el frame rate se calcula:

Frame rate = 1 / ((1.300.000 / 5.000.000) + 0,3) ≈ 1,78 fps

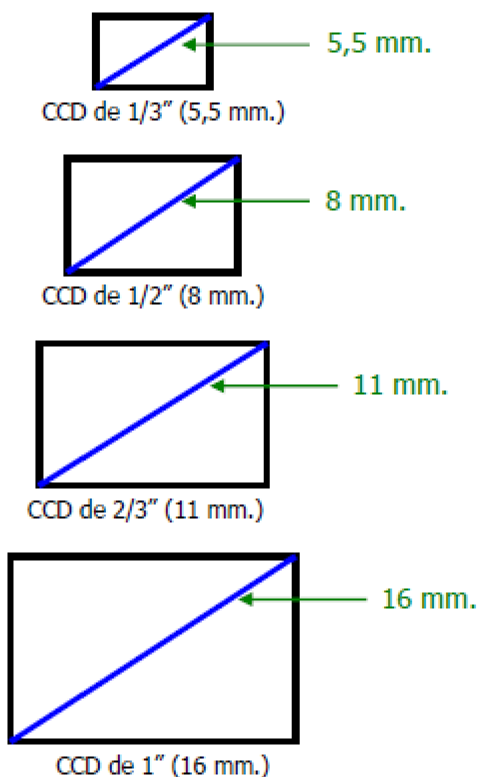
Ganancia

La ganancia en una cámara digital no es inherente al CCD, sino del sistema completo. Los CCD por sí mismos no tienen ganancia; esta se refiere a cuánto amplifica el sistema las cargas eléctricas generadas.

La ganancia se mide en electrones por ADU (Unidad Analógico-Digital o niveles de gris). Por ejemplo, una ganancia de 60 e-/ADU indica que cada nivel de gris representa 60 electrones.

Si una ganancia 1x equivale a 60 e-/ADU, entonces 2x serían 30 e-/ADU (detectando un nuevo nivel cada 30 electrones), y 4x serían 15 e-/ADU, etc.

Para imágenes subexpuestas (pocos fotoelectrones), se puede incrementar la ganancia para amplificar la señal. Pero atención, al subir la ganancia, también se amplifican el ruido térmico y el de lectura, lo que degrada notablemente la relación señal/ruido.



Habitualmente, el tamaño del CCD se expresa en pulgadas (", como 2/3"). Dicho valor representa la diagonal del sensor. Una pulgada equivale aproximadamente a 16 mm.

Algunos fabricantes ahora especifican el tamaño como "ancho x alto" (H x V) en milímetros.

La cantidad de píxeles que alberga un CCD depende de su tamaño y del tamaño de cada píxel. Un CCD de 1" puede contener más píxeles del mismo tamaño que uno de 2/3".

El tamaño del CCD influye en el área total de la muestra visualizada, mientras que el tamaño del píxel afecta significativamente al rango dinámico.

Número de píxeles de un CCD

Al hablar de una cámara de 5 megapíxeles, nos referimos al total de píxeles de su CCD, su resolución espacial.

No todos los píxeles capturan imagen; un pequeño porcentaje se reserva para otros fines, como calibrar el ruido térmico. En la Coolpix 4500, el CCD tiene 4,13 millones de píxeles, pero solo 4 millones son efectivos para captar la imagen.

El número de píxeles determina el tamaño del archivo. Un CCD en color de 1.300 x 1.000 píxeles produce un archivo sin comprimir de 1.300.000 * 3 (canales) = 3.900.000 bytes, unos 3,8 MB

Color en las cámaras digitales

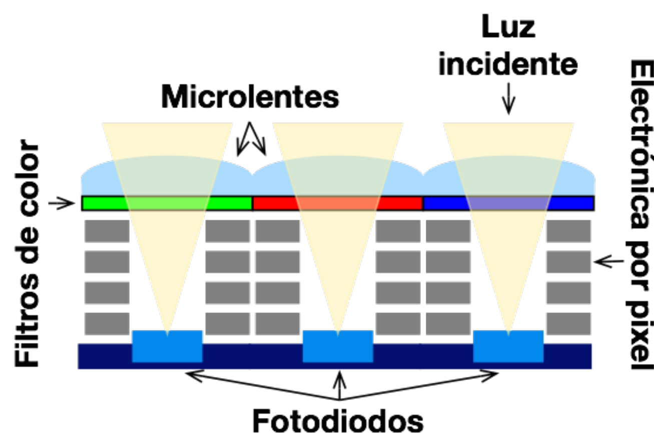
Los CCD operan en "escala de grises", capturando intensidad lumínica y traduciéndola a niveles de gris.

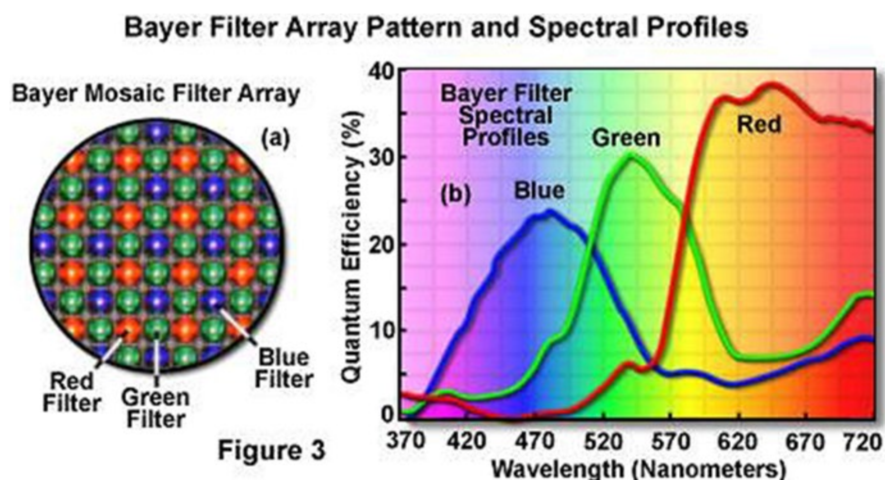
Para lograr color, deben incorporarse filtros. Estrategias principales:

Rueda de filtros: Se sitúa una rueda con filtros delante. La imagen en color se obtiene tomando tres exposiciones separadas (azul, verde, rojo) que luego se fusionan. Este método falla con muestras móviles.

Cámaras de 3 CCD: Emplean prismas y filtros dicroicos para dividir la luz en tres colores. Cada CCD captura un color primario. La imagen final resulta de combinar las tres. Sistema efectivo, pero costoso.

Mosaico de filtros en un único CCD: Muchas cámaras usan un mosaico de filtros sobre un único CCD. Cada píxel tiene un filtro para un color básico. (ver figura).





El conjunto de estos filtros se denomina CFA (Color Filter Array). El más habitual es el Filtro Bayer.

El filtro Bayer posee dos píxeles verdes por cada rojo y azul, pues el ojo humano es más sensible al verde. Dado que los filtros absorben parte de la luz, las cámaras en color suelen ser menos sensibles que las monocromo.

Digitalización

El conversor A/D en una cámara digital transforma el voltaje analógico del CCD en datos digitales. Las características de digitalización se expresan en bits. Una cámara de 12 bits puede representar 2^12 niveles de gris, o sea, 4.096 niveles distintos.

El número de bits indica la cantidad de niveles de gris digitalizables. 8 bits son 256 niveles; 12 bits son 4.096.

Para cámaras en color, 36 bits significan 12 bits por canal (rojo, verde, azul). Cada canal digitaliza 4.096 niveles, lo que teóricamente permite 2^36 colores. En la práctica, esta información es excesiva y la cámara suele convertir la imagen a 24 bits para un manejo más eficiente.

Sensores CCD: Un Vistazo a su Estado Actual

Los sensores CCD, aunque pioneros en fotografía digital, han sido mayormente superados por los CMOS. No obstante, los CCD conservan relevancia en aplicaciones especializadas.

Los CCD han sido desplazados por los CMOS.

Consumo: Los CMOS son notablemente más eficientes energéticamente, algo crítico en dispositivos móviles y cámaras compactas.

Velocidad: Los CMOS typically ofrecen velocidades de lectura superiores, mejorando el rendimiento en video de alta resolución.

Integración: La tecnología CMOS permite integrar otros componentes en el mismo chip, facilitando la miniaturización y nuevas funcionalidades.

A pesar de ello, los CCD aún destacan en ciertos campos:

Astronomía: Los CCD de alta sensibilidad siguen siendo preferidos en telescopios por su bajo ruido y excelente calidad de imagen con luz tenue.

Ciencia: En aplicaciones que demandan alta precisión y amplio rango dinámico, los CCD pueden ser superiores.

Cámaras de cine: Algunas cámaras de cine de gama alta aún emplean sensores CCD para lograr una estética más cinematográfica.

Ventajas residuales de los CCD

Rango dinámico: Tradicionalmente, los CCD han proporcionado un rango dinámico más amplio, capturando una gama más extensa de tonos.

Calidad de imagen: En condiciones de iluminación específicas, los CCD pueden ofrecer una mejor reproducción cromática y un mayor nivel de detalle en comparación con los sensores CMOS.

El futuro de los CCD

Aunque han sido reemplazados en el mercado de consumo, es probable que sigan siendo relevantes en nichos donde la calidad de imagen y sensibilidad son primordiales. Futuras innovaciones podrían permitirles competir más eficazmente con los CMOS.

El panorama actual sentencia el declive irreversible de los CCD hacia roles marginales. Los CMOS apilados marcan el punto de inflexión: al segregar físicamente fotodiodos y circuitos, logran frecuencias de lectura alucinantes, reducen el ruido térmico hasta lo insignificante y ofrecen un rango dinámico que ya compite con el otrora territorio exclusivo de los CCD.

Pero ahí no acaba todo. El obturador global en CMOS elimina de un plumazo la distorsión por rolling shutter en movimientos rápidos. Esto arrebata a los CCD una de sus últimas bazas, incluso en cine y ciencia. Hasta en astronomía -feudo tradicional CCD por su sensibilidad- los CMOS nuevos avanzan imparables gracias a su versatilidad operativa y eficiencia energética.

Y luego está la inteligencia artificial embebida en silicio. Los ISP con aceleradores de IA ejecutan in situ operaciones antes reservadas al postprocesado: desde cancelar ruido y calcular color, hasta reconstruir datos en condiciones lumínicas límite. Esta fusión entre hardware y algoritmos relega los CCD incluso en laboratorios punteros, donde el procesamiento inteligente revela lo invisible.

El veredicto es claro: los CCD sobreviven en nichos ultra-especializados donde se valora la tradición tecnológica, la robustez o ciertos matices tonales. El futuro inmediato, sin duda alguna, pertenece por entero a los CMOS y a su simbiosis con la IA.

Bibliografía:

Fotodiodos en CCDs: Principios Básicos y Funcionamiento. La conversión de fotones en electrones en un CCD. Electro-Optics Research. 2022;45(3):124-138.

Procesamiento de Datos en CCDs: Registro en Serie y Paralelo. Cómo el CCD procesa y amplifica datos. Journal of Imaging Science. 2023;56(2):201-215.

Eficiencia Cuántica en CCDs: Sensibilidad Espectral y Aplicaciones. Eficiencia cuántica en diferentes longitudes de onda. Photonics & Optics Review. 2021;33(4):89-102.

Ruido en Cámaras Digitales: Tipos y Causas. Ruido fotónico, térmico y de lectura en CCDs. Journal of Applied Optics. 2023;68(1):55-70.

Reducción de Ruido en CCDs: Técnicas y Métodos. Enfriamiento y mejoras electrónicas para reducir el ruido. Imaging Technology Reports. 2024;29(2):134-148.

Sensores CCD y su Estado Actual: Comparación con CMOS. Evolución y relevancia en aplicaciones especializadas. Journal of Sensor Technology. 2024;35(1):22-37.

Eficiencia Energética de Sensores CMOS: Ventajas y Aplicaciones. Comparativa con sensores CCD. Energy Efficiency Review. 2023;28(4):101-115.

Velocidad de Lectura en Sensores CMOS: Impacto en la Grabación de Video. Rendimiento en situaciones de alta velocidad. High-Speed Imaging Journal. 2022;41(3):89-104.

Integración de Componentes Electrónicos en Sensores CMOS: Avances y Beneficios. Miniaturización y nuevas funciones. Microelectronics and Systems. 2023;52(2):145-160.

Aplicaciones Especializadas de Sensores CCD: Astronomía, Ciencia y Cine. Uso continuado en áreas específicas. Specialized Imaging Technologies. 2024;17(2):66-80.

Ventajas de los Sensores CCD: Rango Dinámico y Calidad de Imagen. Comparación con CMOS en condiciones específicas. Image Quality Assessment Journal. 2023;30(1):39-52.

Futuro de los Sensores CCD: Innovaciones y Competencia con CMOS. Perspectivas y posibles desarrollos. Journal of Future Technologies in Imaging. 2024;24(3):115-130.



Xavier Pardell